



## POSSÍVEIS CAUSAS DOS SISMOS DOS AÇORES

por  
FREDERICO MACHADO \*

### RESUMO

Os abalos sísmicos dos Açores dependem certamente do mecanismo que faz mover as três placas litosféricas que existem na área destas ilhas. Um modelo de mecanismo que parece adequado para explicar o ritmo das crises sísmicas baseia-se em pulsações de gravitação. Entre as principais perturbações neste ritmo figuram as marés terrestres (especialmente a semi-anual) e as variações de energia elástica disponível, devidas à própria fraturação que produz os abalos.

### ABSTRACT

The earthquakes of the Azores are supposed to result from movement predicted by the Theory of Plate Tectonics. Gravitational pulsations seem to be an adequate mechanism for explaining the rhythm of earthquake swarms.

Some perturbation on the occurrence of the seismic swarms is probably due to Earth tides (mainly the solar semi-annual one) and to change in the available strain energy, produced by the fracturing associated with the swarms.

---

\* Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, 3800 Aveiro.

## INTRODUÇÃO

A periodicidade dos abalos de terra dos Açores tem sido estudada durante as últimas décadas (veja-se, por exemplo, Machado, 1973a).

No presente artigo vão ser discutidas as causas que podem conduzir a essa periodicidade, e também a possibilidade de quantificar a probabilidade de ocorrência das crises sísmicas.

O modelo de mecanismo para os abalos está relacionado com a teoria da Relatividade Geral (Machado, 1980), mas aqui vão ser considerados apenas os resultados finais que têm aplicação imediata ao problema em estudo.

Este trabalho representa uma contribuição para a previsão de abalos de terra (a longo prazo), assunto que tem naturalmente interesse considerável numa região sísmica.

ENQUADRAMENTO NA TECTÓNICA  
DO ATLÂNTICO NORTE

De acordo com a teoria da Tectónica de Placas, coexistem no Atlântico três placas litosféricas principais: a americana, a euro-asiática e a africana (veja-se a Fig. 1).

Estas placas são separadas pelo rift médio do Atlântico e pela faixa Açores-Gibraltar que prolonga para oeste a cadeia orogénica alpina (faixa de subdução). O rift médio está certamente a abrir, ao passo que a cadeia alpina está a contrair-se.

Os Açores estão situados sobre a junção tripla onde se ajustam estas três placas. A tectónica das ilhas é complexa e não há, por enquanto, consenso sobre o modelo que melhor se adapta à realidade geológica.

POSSÍVEIS CAUSAS DOS SISMOS DOS AÇORES



Fig. 1 — Placas do Atlântico Norte

Na Fig. 2 vai representado um modelo, um tanto duvidoso, no qual o rift médio do Atlântico está dividido em troços curtos que atravessam algumas das ilhas (*Machado & al.*, em prep.). A geologia dessas ilhas concorda razoavelmente com o modelo, mas o traçado das falhas transformantes, situadas no mar, é muito incerto. Por outro lado, a contracção que a cadeia alpina exhibe no Mediterrâneo parece diminuir para oeste, passando por um ponto de deformação nula e apresentando depois uma pequena expansão que é representada pelo chamado rift da Terceira (e por ventura por outros, paralelos, passando em S. Jorge e no Pico).

A elevada sismicidade das ilhas é certamente devida ao movimento das placas nesta junção tripla. Quando for possível localizar com rigor os epicentros dos abalos de terra, sugirá naturalmente o traçado real das falhas transformantes admitidas na Fig. 2.

## INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES DE GRAVITAÇÃO

As chamadas variações de gravitação constituem uma teoria que, por enquanto não é susceptível de verificação directa. Contudo, a teoria representa um dos melhores mecanismos para a deslocação das placas. E, enquanto as consequências da teoria forem compatíveis com os dados experimentais ela tem de considerar-se aceitável.

A teoria baseia-se no princípio de Mach que diz que a massa dum corpo depende de todas as outras massas do Universo. Esta dependência poderá ser através dum potencial newtoniano; convém então admitir que a massa de qualquer corpo está afectada por um factor dado pela equação

$$\mu = \sqrt{-2U/c} \quad (1)$$

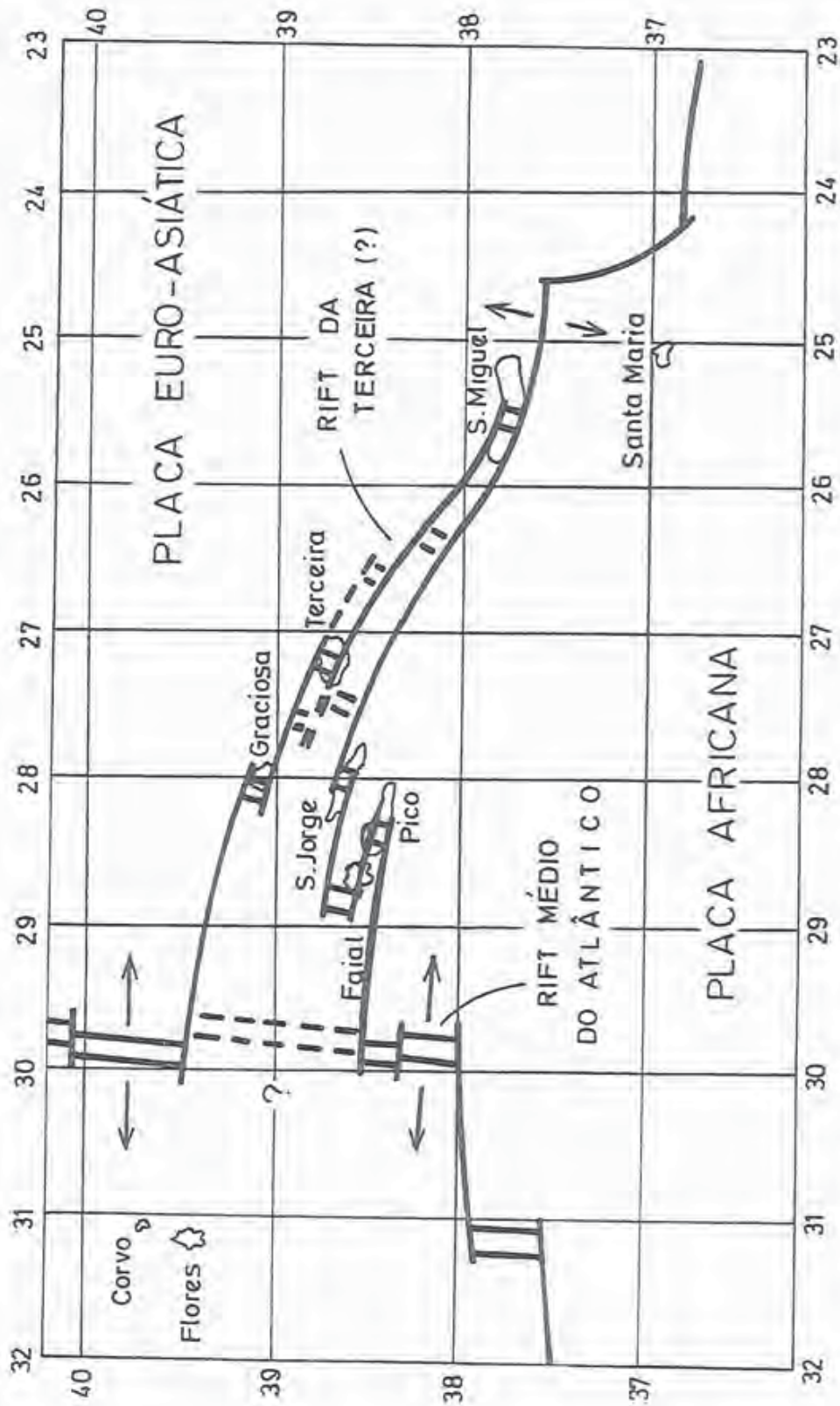


Fig. 2 — Esquema da tectónica dos Açores (Seg. Machado et al., artigo em preparação)

onde

$$U = -G \int_{\Omega} \frac{\rho}{r} d\Omega \quad (2)$$

é o potencial produzido pelo volume elementar  $d\Omega$  com densidade  $\rho$ , situado à distância  $r$ ;  $G$  é a constante de gravitação,  $c$  é a velocidade da luz, e o integral deve estender-se ao chamado universo «visível».

A atracção entre dois corpos de massas  $m_1$  e  $m_2$  será dada por

$$F = G \frac{(\mu m_1)(\mu m_2)}{d^2} \quad (3)$$

onde  $d$  é a distância entre os centros dos corpos.

A força vem portanto afectada por um factor  $\mu^2$  que deverá ser vizinho da unidade, em consequência da forma como foram estabelecidas as unidades de massa e a constante  $G$ .

Se ao longo da órbita galáctica do sistema solar houver variações do universo visível (e portanto de  $U$ ), esta teoria constitui um poderoso meio de fazer variar a pressão no interior da Terra. Daqui resultará variação do volume das zonas mais profundas, o que vai produzir abertura dos riftes ou encurtamento das faixas de subducção, conforme haja diminuição ou aumento de  $\mu$ .

Uma variação periódica é fácil de explicar se o plano da órbita galáctica corresponder a um mínimo da energia potencial que, para uma massa unitária, é igual a  $U$  (cf. Machado, 1973b).

Na Fig. 3 indica-se uma variação de  $U$  de forma parabólica para um e outro lado do plano galáctico (o que representa uma primeira aproximação para o mínimo referido).

POSSÍVEIS CAUSAS DOS SISMOS DOS AÇORES

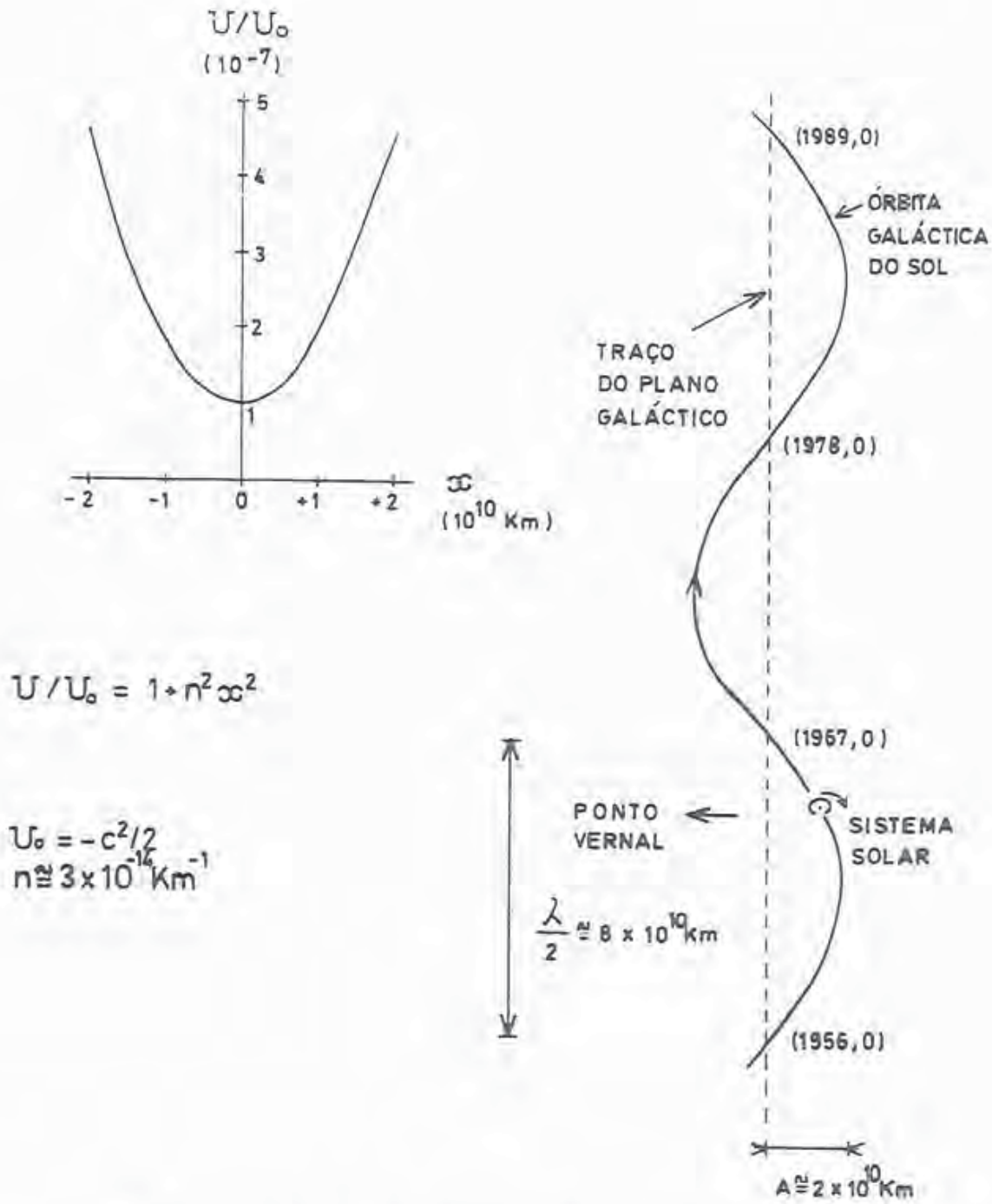


Fig. 3 — Oscilação do sistema solar na órbita galáctica

Essa variação pode exprimir-se na equação

$$U = U_0 (1 + n^2 x^2) \quad (4)$$

onde  $U_0$  é o mínimo da energia potencial,  $x$  é a distância ao plano galáctico e  $n$  é uma constante adequada.

Haverá portanto uma força atractiva

$$F = dU / dx = 2 U_0 n^2 x \quad (5)$$

Se no plano galáctico for  $\mu=1$ , virá por (1)  $U_0 = -c^2/2$  e portanto

$$F = -n^2 c^2 x \quad (6)$$

e a equação do movimento (perpendicular ao plano galáctico) será

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + n^2 c^2 x = 0 \quad (7)$$

onde  $t$  é o tempo.

A solução é

$$x = A \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\tau} (t - t_0) \quad (8)$$

onde  $A$  e  $t_0$  são constantes e

$$\tau = 2\pi / nc \quad (9)$$

é o período da oscilação.

Para  $\tau=22$  anos (que veremos corresponder ao intervalo de 5,5 anos entre crises sísmicas) vem  $n = 3 \times 10^{-14} \text{ km}^{-1}$ . Numa tentativa de quantificação vamos também fixar  $A = 2 \times 10^{10} \text{ km}$ .

A oscilação definida por (8) vai compor-se com a deslocação na órbita galáctica, dando uma trajectória sinusoidal (Fig. 3).

Atendendo a (4), a variação relativa de  $U$  será

$$(U - U_0) / U_0 = \delta U / U_0 = n^2 x^2 \quad (10)$$

e substituindo (8)

$$\begin{aligned} \frac{\delta U}{U} n^2 A^2 \operatorname{sen}^2 \frac{2\pi}{\tau} (t - t_0) &= \\ &= \frac{n^2 A^2}{2} \left[ 1 - \cos \frac{4\pi}{\tau} (t - t_0) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

onde o período é agora  $\tau/2 = 11$  anos.

A variação relativa máxima é  $n^2 A^2 = 3,6 \times 10^{-7}$ , em boa concordância com a ordem de grandeza sugerida anteriormente para a abertura dos oceanos (Machado, 1970).

#### EFEITO DO MOVIMENTO DA TERRA EM VOLTA DO SOL

O plano da órbita da Terra no sistema solar é sensivelmente perpendicular ao plano galáctico (Fig. 4).

O movimento orbital da Terra vai portanto contribuir para a variação  $\delta U / U_0$ . O diâmetro da órbita terrestre é  $2B = 3,0 \times 10^8$  km, cerca de 70 vezes menor do que a admitida amplitude da oscilação discutida no parágrafo anterior.

A maioria dos abalos de terra ocorre em falhas pré-existentes, onde a força que actua se assemelha a uma força de atrito, grosseiramente proporcional à velocidade. Numa pri-

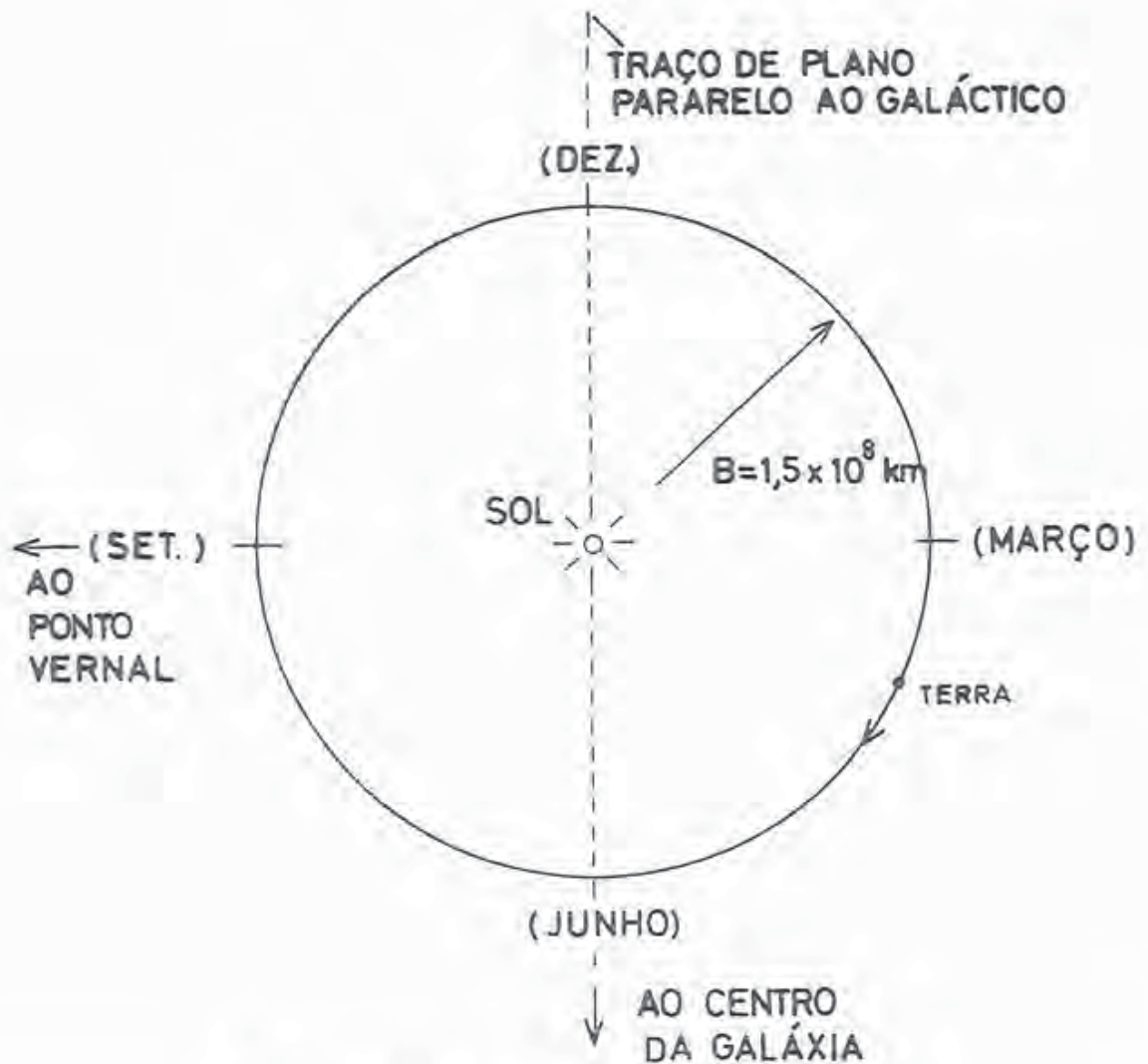


Fig. 4 — Órbita da Terra (vista do lado sul)

meira aproximação, podemos então considerar o número de abalos por unidade de tempo proporcional à derivada, em ordem ao tempo, de  $\delta U/U_0$ , obtida de (10),

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta U}{U_0} = 2n^2 x \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

Substituindo

$$x = A \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\tau} (t - t_0) + B \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\tau'} (t - t_0') \quad (13)$$

vem

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\delta U}{U_0} = 2n^2 \left[ A \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\tau} (t-t_0) + \right. \\ \left. + B \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\tau'} (t-t_0') \right] \left[ \frac{2\pi A}{\tau} \cos \frac{2\pi}{\tau} (t-t_0) + \right. \\ \left. + \frac{2\pi B}{\tau'} \cos \frac{2\pi}{\tau'} (t-t_0') \right] \quad (14) \end{aligned}$$

Fazendo  $A = 2 \times 10^{10}$  km,  $B = 1,5 \times 10^8$  km,  $n = 3 \times 10^{-14}$  km<sup>-1</sup>,  $\tau = 22$  anos,  $\tau' = 1$  ano, e admitindo  $t_0 = t_0' \cong 1934, 0$ , obtemos

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\delta U}{U_0} = 1,0 \times 10^{-7} \left[ \operatorname{sen} \frac{2\pi}{11} (t-1934,0) + \right. \\ \left. + 0,33 \operatorname{sen} \frac{2\pi}{22} (t-1934,0) \times \right. \\ \left. \times \cos 2\pi (t-1934,0) \right] \quad (15) \end{aligned}$$

onde desprezamos  $AB$  e  $B^2$  em face de  $A^2/2$ ;  $t$  é evidentemente expresso em anos (do calendário).

A curva da equação (15) foi traçada na Fig. 5. O efeito do movimento da Terra em torno do Sol vai naturalmente actuar como excitação para a produção de abalos.

É importante notar que no fim de cada 11 anos os máximos da excitação sofrem um desvio de 6 meses. Em 1934-45 os máximos estavam sensivelmente no solestício do inverno, em 1945-46 no solestício do verão e assim por diante. Por outro lado, a excitação está correlacionada com o máximo da curva quando a derivada  $(d/dt) \delta U/U_0$  é positiva e com o mínimo quando esta derivada é negativa.

Na Fig. 5 definem-se as fases de expansão em que a derivada é positiva e as fases de contracção em que a derivada é negativa.

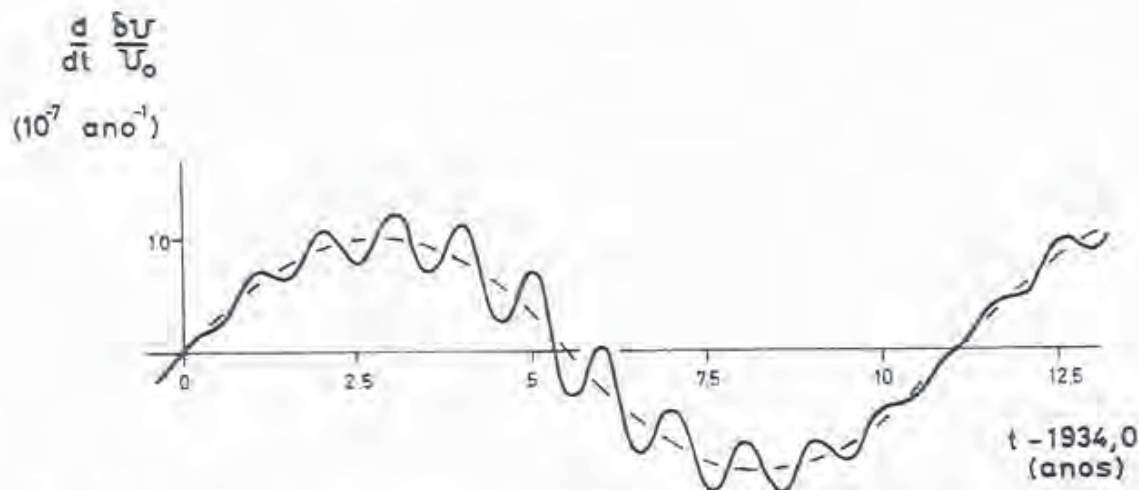


Fig. 5 — Derivada (em ordem ao tempo) da variação do potencial  $U$ , na Terra

### PERTURBAÇÕES NO RITMO DOS ABALOS

Parece que o número de abalos por unidade de tempo é grosseiramente proporcional a  $(d/dt) \delta U/U_0$ . Há contudo razões que justificam desvios a uma correlação perfeita.

Uma das principais irregularidades provém do próprio escorregamento das falhas activas. Sempre que há uma crise sísmica, liberta-se energia elástica e leva algum tempo até haver de novo acumulação suficiente para produzir outra crise.

Esta recuperação parece durar 2 ou 3 anos. As médias correntes de 3 anos dão, com efeito, para a variação do número anual de sismos uma forma razoavelmente sinusoidal, conforme se vê na Fig. 6. Consideraram-se como positivos os sismos das fases supostas de expansão e como negativos os sismos das fases supostas de contracção. Isto corresponde ao sinal da derivada  $(d/dt) \delta U/U_0$  da Fig. 5. A contracção máxima é atingida evidentemente à passagem no plano galáctico (cf. Fig. 3).

Uma outra importante perturbação no ritmo dos sismos é devida à maré terrestre. Em consequência das propriedades

POSSÍVEIS CAUSAS DOS SISMOS DOS AÇORES

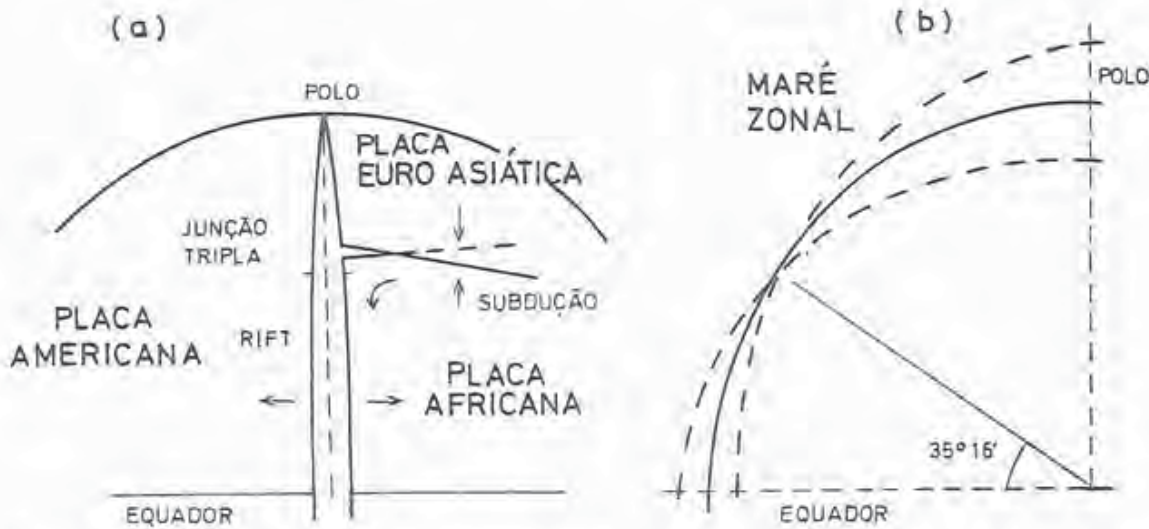


Fig. 6 — Número anual de sismos (média corrente de 3 anos) de 1934,0 a 1956,0

reológicas da astenosfera (cf. Machado, 1974), a componente que tem maior influência é a solar semi-anual (*Ssa*).

Esta maré *Ssa* é uma função zonal que se anula à latitude de  $35^{\circ} 16'$ , vizinha da latitude dos Açores. O efeito parece depender da existência de ligação mais ou menos firme entre as placas euro-asiática e africana (cf. Fig. 7).

Quando estas duas placas estão ligadas, o potencial na vizinhança dos Açores tem a amplitude aproximada

$$W = + 0,42 G_0 \quad (16)$$

onde  $G_0 = 955 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ . Esta maré é máxima nos equinócios.

Quando as placas estão soltas o efeito inverte-se, vindo aproximadamente

$$W = - 0,46 G_0 \quad (17)$$

sendo a maré agora máxima nos solstícios.

Esta maré *Ssa* vai também actuar como excitação na ocorrência de sismos. Quando se verifica a equação (16), as crises sísmicas de expansão tendem a ocorrer no verão ou no inverno (maré crescente); quando, pelo contrário, se verifica (17), as

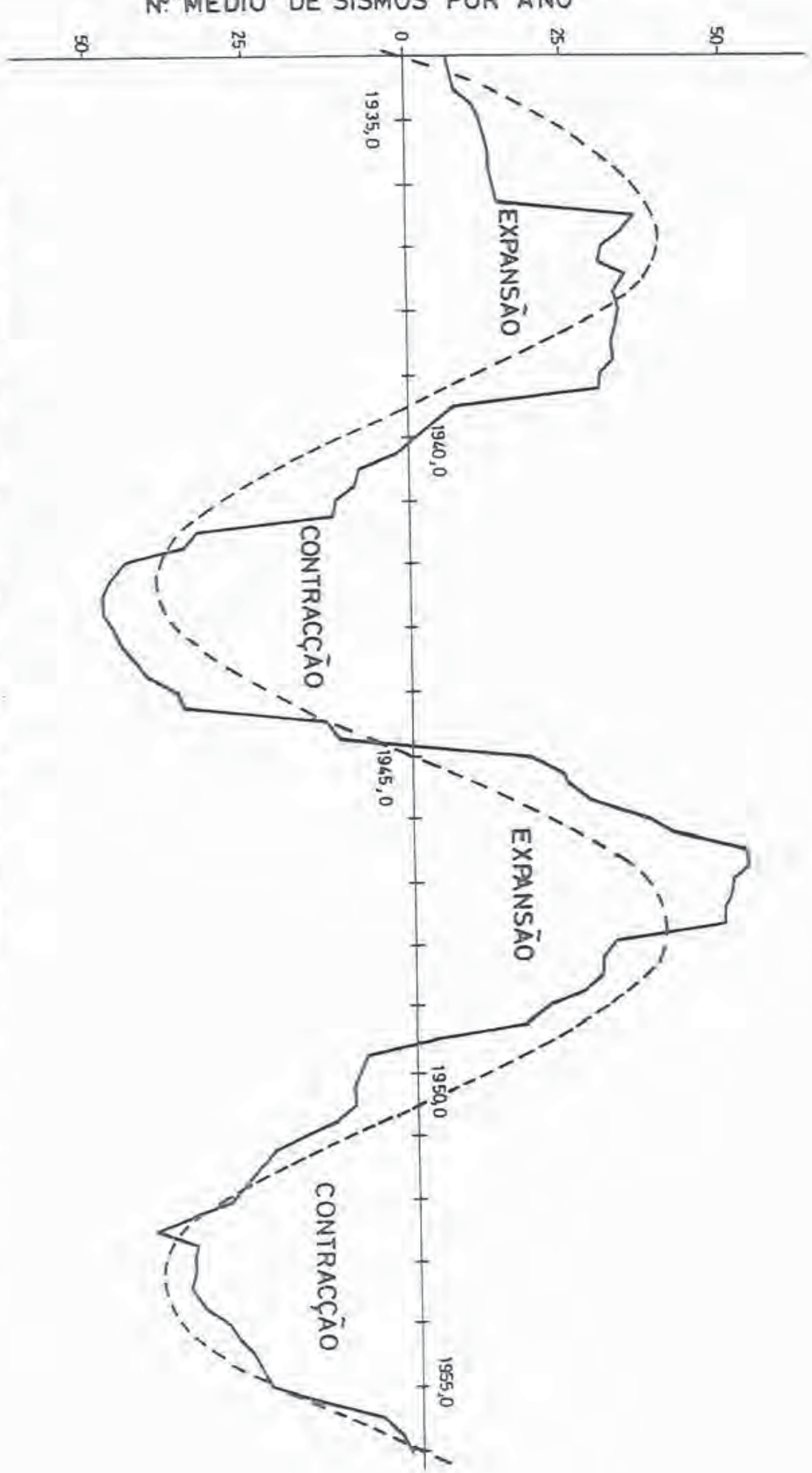


Fig. 7 — Elementos para interpretação do eefito da maré terrestre:  
 (a) Esquema do Atlântico; (b) Corte com a maré zonal (que está muito exagerada)

## POSSÍVEIS CAUSAS DOS SISMOS DOS AÇORES

crises de expansão serão mais prováveis na primavera ou no outono. O contrário deverá acontecer nas crises de contracção.

Este efeito da maré vai, portanto, desviar para um ou outro lado dos solestícios a culminação devida ao movimento da Terra em volta do Sol.

A ligação entre as placas euro-asiática e africana não está completamente compreendida. Esta ligação parece ter existido antes de 1928,5, e ter praticamente desaparecido nos 33 anos seguintes (1928,5 a 1961,5), voltando a aparecer em 1961,5. Não há, porém a certeza deste ritmo se manter no futuro.

## PERIODICIDADE DAS CRISES SÍSMICAS

Na Fig. 8 apresenta-se a frequência dos abalos dos Açores. Admitiu-se, de acordo com a teoria dos parágrafos anteriores, que as fases de expansão alternam com as de contracção. O ritmo é razoavelmente regular.

Quanto à excitação devida ao movimento orbital da Terra e à maré terrestre, indicam-se no quadro seguinte as épocas de culminação das crises. Há alguma irregularidade, o que é talvez próprio de causas secundárias que actuam como excitação.

<i>Fases de expansão</i>		<i>Fases de contracção</i>	
Intervalo	Culminação	Intervalo	Culminação
1923, 0 — 1928, 5	Verão	1928, 5 — 1934, 0	Inverno
1934, 0 — 1939, 5	Outono	1939, 5 — 1945, 0	?
1945, 0 — 1950, 5	Primavera	1950, 5 — 1956, 0	Inverno
1956, 0 — 1961, 5	Outono	1961, 5 — 1967, 0	?
1967, 0 — 1972, 5	Verão	1972, 5 — 1978, 0	Outono
1978, 0 — 1983, 5	Inverno	...	

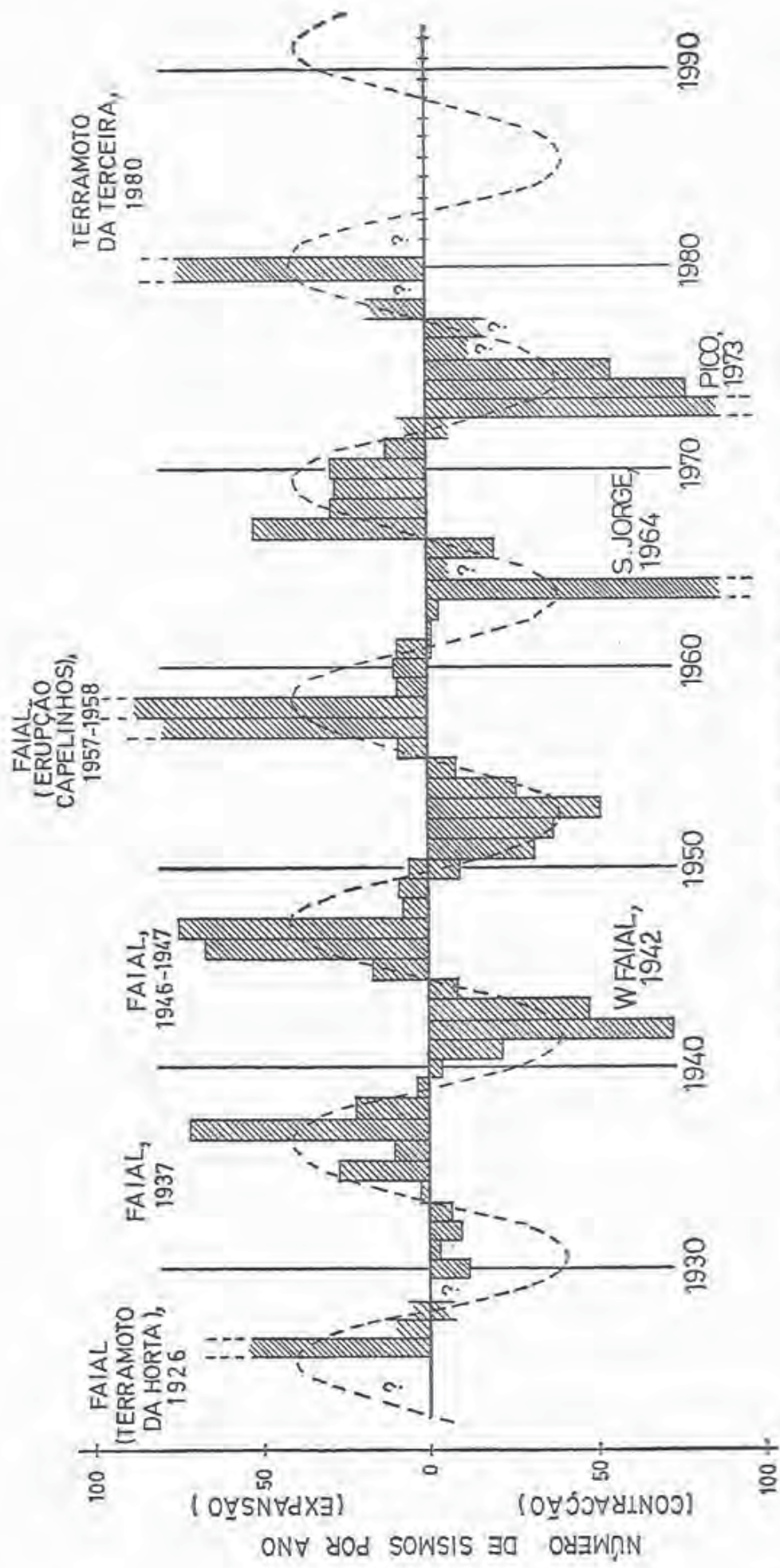


Fig. 8 — Número anual de sismos de 1923,0 a 1981,0

A crise de 1942 deveria ter sido no verão e a de 1964 na primavera; de facto ocorreram, respectivamente, no outono e no fim do inverno. O efeito da maré parece ter-se invertido em 1928,5 e em 1961,5. Talvez possa haver uma nova inversão em 1994,5, mas, como se disse, este fenómeno não está bem compreendido.

Quanto às ilhas onde ocorrem as várias crises, parecia haver tendência para as fases de expansão darem abalos no Faial e no Pico (*Machado, 1973a*) e as de contracção, na Terceira e S. Miguel (e S. Jorge). A crise de 1973 (contracção) apareceu, porém, no Pico; e a de 1980 (expansão), na Terceira. A distribuição por ilhas é, portanto aparentemente irregular.

Parece de esperar uma próxima crise entre 1984 e 1986 que culminará talvez na primavera. Não se sabe, porém, ao certo quais as ilhas que serão afectadas.

Em qualquer caso, o número provável de sismos por ano pode ser dado por uma expressão análoga a (15)

$$N = N_0 \left| \operatorname{sen} \frac{2\pi}{11} (t - 1934,0) \right| \quad (18)$$

onde  $N_0$  tem o valor «médio» de cerca de 40, para abalos sentidos, e valor 5 a 10 vezes maior, para abalos registados nos sismógrafos. Na expressão (18) desprezou-se o efeito do movimento orbital da Terra.

### AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Prof. Renato Araújo a leitura crítica do manuscrito deste artigo. Os desenhos foram preparados por M. Graça Marques, a quem o autor também agradece.

## REFERÊNCIAS

- MACHADO, F., (1970) — Aspectos quantitativos das pulsações de gravitação, *Bol. Mus. Lab. Geol. Fac. Ciênc. (Lisboa)*, v. 11, pp. 211-222.
- (1973a) — Periodicidade sísmica nos Açores, *Com. Serv. Geol. Port.*, v. 56, pp. 475-484.
- (1973b) — A hipótese de uma pulsação de gravitação com período de 11 anos, *Garcia da Orta, Ser. Geol.*, v. 1, pp. 27-36.
- (1974) — Reologia do manto superior terrestre em áreas oceânicas, *Garcia da Orta, Ser. Geol.*, v. 1, pp. 89-96.
- (1980) — Relatividade geral e geotectónica, *Arquipélago, Ser. Ciên. Nat.*, v. 1, pp. 19-28.
- MACHADO, F., REIS, P., e SILVEIRA, E. (em preparação) — Sobre a profundidade de focos sísmicos no Atlântico-Norte. Comunicação ao 1. *Congr. Nac. de Geologia*, Aveiro, 1983.